

論文 ペースト及びモルタルの流動性に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響評価

表 道和*¹ 出光 隆*² 山崎 竹博*³ 佐藤 美帆*⁴

要旨: 高流動コンクリートは増粘剤, 高性能 AE 減水剤, シリカ質微粉末など, 主としてペーストの流動性改善に使用される混和材料の粒子によって数種の形式に分類される。いずれの形式でも, 粗骨材間を占めるモルタルの流動性は細骨材間を占めるペーストの流動性に依存する。一般に, ペーストの流動性は水粉体容積比と減水剤添加率から推定でき, モルタルの流動性はペーストの流動性とペースト細骨材容積比から推定できる。従ってモルタルの流動性はこれらの関係に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響を定量化することにより推定が可能となる。本研究では, これらのモルタルの配合と流動性との関係について実験的考察をしたものである。

キーワード: 高性能 AE 減水剤, フロー面積比, 流動性

1. はじめに

一般に, コンクリートは粗骨材と細骨材をセメントと水からなるペーストで接着したものと定義されてきた。これに対し, 近年使用実績の増えてきた高流動コンクリートは, 分散媒である水に図-1に示す混和剤ポリマー, シリカ質超微粒子などを分散相として用いた分散系を基本とした流体であることを要求されている。コンクリートは図-2に示すように, コロイド分散系を更に分散媒として微粒子, セメント, 連行空気などの粗大分散系を分散した微多層系のペーストに細骨材, 粗骨材を混合した混相流体でなければならない。このように多くの配合要因を持つ高流動コンクリートの配合を一意的に定めることは困難である。そこで, 流動性を与える影響要因を整理するため, 過去の経験と試験練りから適切な流動性が得られる範囲で配合を定め, これらの流動性が得られるペースト, モルタル相の流動性に与える化学混和剤の影響について実験的考察を行った。

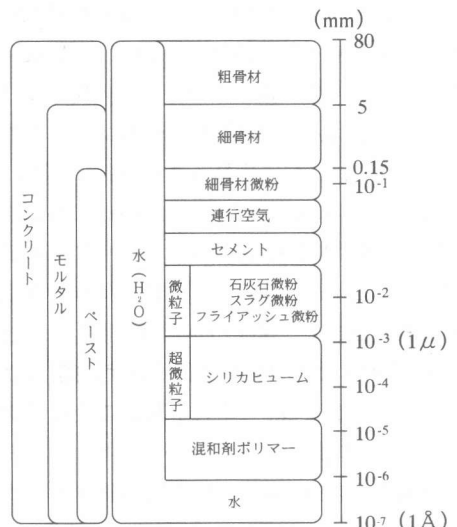


図-1 高流動コンクリートの構成材料及び粒径

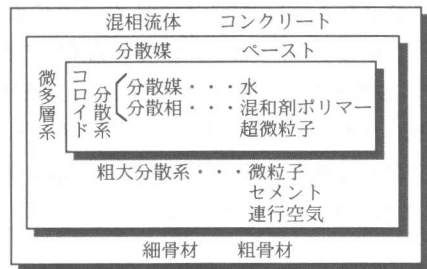


図-2 材料の分類

2. 高性能 AE 減水剤を使用した

ペーストの流動特性

ペースト層に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響

については既に報告しているので¹⁾, 本論文に必要な概要を述べる。本論文では以後の文章中便宜上, 高性能 AE 減水剤を減水剤*と記すこと

*1 九州工業大学大学院 工学研究科 設計生産工学専攻 (正会員)
 *2 九州工業大学教授 工学部 建設社会工学科 (正会員)
 *3 九州工業大学助教授 工学部 建設社会工学科 (正会員)
 *4 九州工業大学大学院 工学研究科 設計生産工学専攻

にする。既報の論文¹⁾では、高流動コンクリートに使用するペーストの流動性に与える減水剤*の影響の他に、粉末度の異なるスラグ微粉末のフロー試験への影響も考慮している。本研究では、これらのペーストとモルタルの流動性の関係を評価する指標を検討するため、まず混和材としての微粒子使用の影響因子を除外して、水+セメント+減水剤*のコロイド系ペーストを用いてフロー試験を行った。ペーストフロー面積比 (Γ_p) と水粉体容積比 (V_w/V_b) には図-3に示す関係が得られる。同図で、水粉体容積比とペーストフロー面積比の関係は混和材微粒子の置換率や減水剤*添加率を変えてもほぼ直線関係であると仮定できる。その直線の切片及び傾きを拘束水比 β_p 、単位フロー水比 α_p とすれば直線は、式(1)のように表される。ここで、拘束水比 β_p および単位フロー水比 α_p に与える減水剤*添加率の影響は、図-4のように混和剤添加率ごとに示される直線の切片と傾きから求められる。そこで、式(1)中の係数 β_p 、 α_p と減水剤*添加率との関係を図示すれば、図-5のようになる。 β_p 、 α_p ともに混和剤の使用量が増えるにつれて低下することが分かる。これらの値の低下量をSP/Bが0%の時の値を基準にした低下率 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\alpha$ として示せば β_p および α_p は、それぞれ式(2)および(5)のように表される。このとき $\Delta\beta$ 、 $\Delta\alpha$ は既報の論文¹⁾では、図-6の破線のように式(3)および(6)を用いて表される。本実験のように単位セメント量一定で混和材微粉を用いない場合には図-6の実線、式(4)、(7)のように示される。

3. モルタルの流動特性に関する実験概要

3.1 使用材料

ペースト及びモルタルの流動性に関する実験には、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3 、比表面積 $3220\text{cm}^2/\text{g}$)、細骨材(海砂、密度 2.55g/cm^3 、粗粒率2.94、実積率55.9)、高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)を使用した。

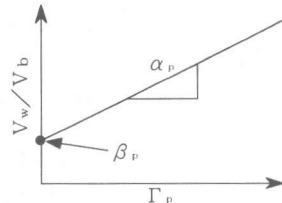


図-3 ペーストフロー面積比と水粉体容積比の関係

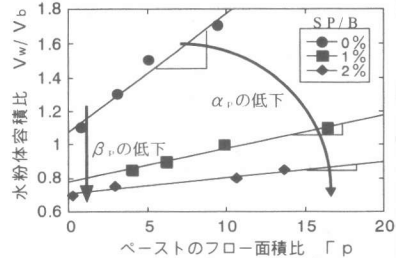


図-4 ペーストのフロー面積比と水粉体容積比の関係

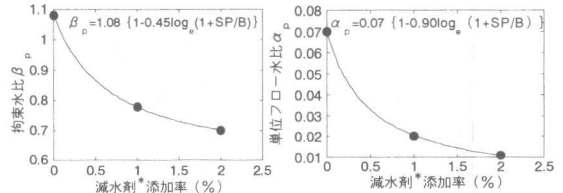


図-5 減水剤*添加率と拘束水比・単位フロー水比の関係

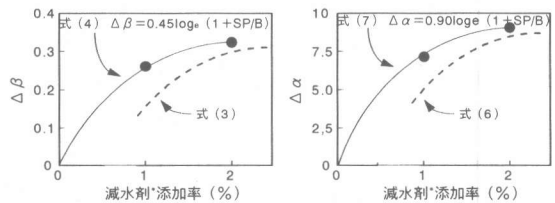


図-6 減水剤*添加率と低下率 $\Delta\beta$ ・ $\Delta\alpha$ の関係

$$\Gamma_p = \frac{(V_w/V_b) - \beta_p}{\alpha_p} \quad (1)$$

$$\beta_p = \beta_0 (1 - \Delta\beta) \quad (2)$$

$$\Delta\beta = a_{(K)} \cdot \log_e (SP/B) + b_{(K)} \quad (3)$$

$$\Delta\beta = A \cdot \log_e (SP/B+1) \quad (4)$$

$$\alpha_p = \alpha_0 (1 - \Delta\alpha) \quad (5)$$

$$\Delta\alpha = c_{(K)} \cdot \log_e (SP/B) + d_{(K)} \quad (6)$$

$$\Delta\alpha = B \cdot \log_e (SP/B+1) \quad (7)$$

ここに

β_p : 拘束水比

α_p : 単位フロー水比

$\Delta\beta$: 拘束水比の低下率

$\Delta\alpha$: 単位フロー水比の低下率

β_0 : 混和剤無添加時の拘束水比

α_0 : 混和剤無添加時の単位フロー水比

定数: A, B, $a_{(K)}$, $b_{(K)}$, $c_{(K)}$, $d_{(K)}$

3.2 フロー試験

ペースト，モルタルの練り混ぜにはJ I S R 5201「セメントの物理試験法」に定めるミキサを使用した。試験は20℃の恒温室内で行い，フロー値は振動を加えない状態で測定した。フローの最大径とそれに直角方向の値から式(8)よりフロー面積比 Γ_p を計算した。

$$\Gamma_p = \left(\frac{f_p}{f_0} \right)^2 - 1 \quad (8)$$

f_p : フローの平均値 (mm)

f_0 : フローコーンの底面直径 (100mm)

4. 実験結果

4.1 実験に用いるペーストの流動特性

モルタルフロー面積比(Γ_m)が5.25~8.0であるモルタルを作製し，細骨材間を満たすペーストの流動特性を調べた。その特性値を基にペースト量と細骨材量の配合比を変化させモルタルの流動特性に及ぼす配合要因の影響を検討した。今回使用したペーストのフロー試験結果は表-1の通りであった。同結果から式(4)および(7)を用いて β_p ， α_p を算出し，ペーストのフロー面積比に与える減水剤*の影響評価式を式(9)のように定めた。

$$\Gamma_p = \frac{(V_w/V_b) - 1.08 \{1 - 0.45 \log_e (1 + SP/B)\}}{0.07 \{1 - 0.90 \log_e (1 + SP/B)\}} \quad (9)$$

表-1に示す実験値から算出した β_p ， α_p ， $\Delta\beta$ ， $\Delta\alpha$ の各値は図-4，5，6にそれぞれ示す通りである。式(9)を用いて算出したペーストのフロー面積比の推定値と実験値との比較を図-7に示す。フロー面積比が15程度以下では式(9)は実験値を近似できることが判る。

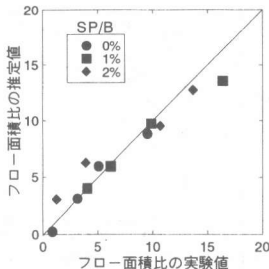


図-7 ペーストフロー面積比の推定値と実験値の比較

表-1 ペーストのフロー試験結果

SP/B	V_w/V_b	Γ_p
0	1.10	0.85
	1.30	3.12
	1.50	5.05
	1.70	9.50
1	0.85	4.02
	0.90	6.18
	1.00	9.89
	1.10	16.39
2	0.70	0.28
	0.75	2.92
	0.80	9.82
	0.85	13.67

4.2 モルタルの流動性

減水剤*添加率が高流動コンクリート用モルタルの流動性状に与える影響を調べる目的で，減水剤*添加率(SP/B)を0, 1.0, 2.0%とし，ペースト細骨材容積比(V_p/V_s)が1.0, 1.2, 1.5の場合のモルタルフロー値を測定した。このとき，ペーストの水粉体容積比は減水剤*添加率ごとに適切なモルタルフロー値が得られるよう予備実験から定めた値とした。それらのモルタルフロー試験結果を表-2に示す。

表-2 モルタルのフロー試験結果

SP/B	V_w/V_b	Γ_p	V_p/V_s	Γ_m
0	1.625	7.8	1.0	1.59
			1.2	3.62
			1.5	5.40
	1.920	11.9	1.0	4.02
			1.2	5.60
			1.5	5.40
1	0.850	4.8	1.0	1.31
			1.2	3.24
			1.5	5.40
	0.910	8.4	1.0	2.46
			1.2	5.40
			1.5	7.70
0.950	10.9	1.0	3.22	
		1.2	6.16	
		1.5	8.99	
2	0.725	0.3	1.0	3.67
			1.2	4.34
			1.5	5.50
	0.800	9.8	1.0	5.76
			1.2	7.07
			1.5	8.18
0.850	20.5	1.0	6.81	
		1.2	8.18	
		1.5	9.63	

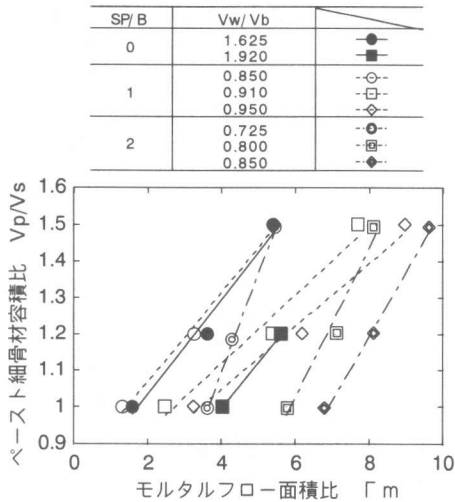


図-8 ベースト細骨材容積比とモルタルフロー面積比の関係

表-2の結果から、ペースト細骨材容積比とモルタルフロー面積比との関係を減水剤*添加率ごとに図-8に示した。図-8から、一定の流動性を持つペーストに細骨材を加えるにつれモルタルフロー面積比は直線的に小さくなるが判る。

図-9に水粉体容積比とモルタルフロー面積比との関係を示した。モルタルフロー面積比が1～10程度の範囲ではペースト細骨材容積比がそれぞれ一定の場合の水粉体容積比とモルタルフロー面積比との関係は、減水剤*添加率ごとに実線、破線、一点鎖線で示される各グループに区別される。これらの結果は、各減水剤*添加率が一定であるグループ内でペースト細骨材容積比別にそれぞれ円形、四角形、ひし形で示す直線で表されることが判る。このように、モルタルフロー面積比は式(9)で算定されるペーストのフロー面積比から一義的に決定できず、本研究ではまず、使用する水粉体容積比と減水剤*添加率でのペーストのフロー面積比を求め、その値に対するモルタルのフロー面積比をペースト細骨材容積比と減水剤*添加率ごとの両者の相関直線から算出する方法について検討した。

4.3 ベーストとモルタルの流動性

表-2の結果より、ペーストとモルタルのフロー面積比の値を取り出し図-10のように示し

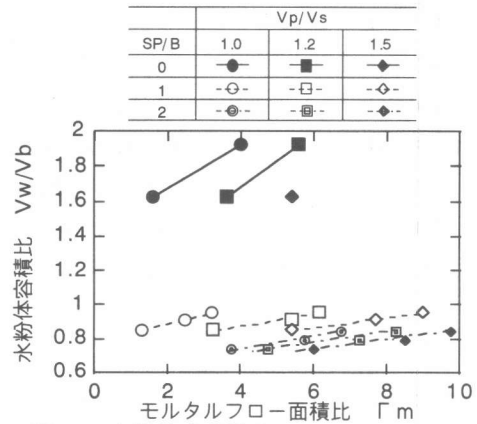


図-9 水粉体容積比とモルタルフロー面積比の関係

た。同図から、ペーストフロー面積比が0でも、これに細骨材を加えた場合、モルタルの比重が大きいため、減水剤*を多く使用したモルタルではフロー面積比がペーストよりも大きくなった。これらの値は、ペーストフロー面積比が0での縦軸の切片にあたり、その値 $C_{(SP/B, Vp/Vs)}$ は、図-11に示すように減水剤*添加率ごとに式(12)、(13)、(14)で算定される直線として表される。さて、図-10の、直線群の傾きは、減水剤の添加率ごとに小さくなるので、その影響を図-12に示し、傾きの係数 $I_{(SP/B)}$ を求めれば式(17)のようになる。従って、任意の配合のモルタルのフロー面積比は式(10)のように計算されることになる。

	SP/B	Vp/Vs	Γm
●	0	1.0	$\Gamma m = -3.00 + 0.59 \Gamma p$
		1.2	$\Gamma m = -0.12 + 0.48 \Gamma p$
		1.5	$\Gamma m = 0.49 + 0.63 \Gamma p$
○	1	1.0	$\Gamma m = -0.18 + 0.31 \Gamma p$
		1.2	$\Gamma m = 0.97 + 0.49 \Gamma p$
		1.5	$\Gamma m = 2.63 + 0.59 \Gamma p$
◎	2	1.0	$\Gamma m = 3.84 + 0.16 \Gamma p$
		1.2	$\Gamma m = 4.60 + 0.19 \Gamma p$
		1.5	$\Gamma m = 5.69 + 0.20 \Gamma p$

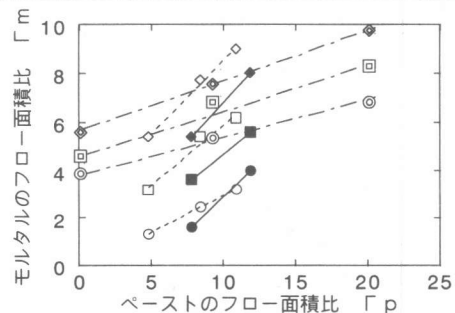


図-10 モルタルとペーストのフロー面積比の関係

4.4 モルタルフロー面積比算定式の係数

式(10)の切片 $C_{(SP/B, Vp/Vs)}$,傾き $I_{(SP/B)}$ を求め
るため, 図-10のペーストとモルタルのフロー
面積比の関係を回帰直線式で表した。同式の縦
軸座標の切片と傾きを表-3に示した。同表から
切片の値とペースト細骨材容積比の関係を求め
図-11に示した。図中の減水剤*添加率ごとの
各直線は, 一定の傾きを持つと仮定すれば, 式

(11)のように表される。式中の $C_{(SP/B, 0)}$ は

ペースト細骨材容積比が0の点, すなわち, 細骨
材のみの仮想のフロー面積比を示すものであ
る。この時, 水粉体容積比はモルタルフロー面積
比が1~10程度になるように実用的なペースト
細骨材容積比および減水剤*添加率にあわせて任
意に定めた値である。細骨材の仮想フロー面積
比 $C_{(SP/B, 0)}$ を求めるため, 図-11の各直線の回帰
式を求めたところ式(12), (13), (14), の
ように表された。回帰式で得られた $C_{(SP/B, 0)}$ の
値を減水剤*添加率との関係として図-12に示
す。同図から各減水剤*添加率を考慮した $C_{(SP/B, 0)}$
の値は式(15)のように表される。よっ
て, 式(15)を式(11)に代入すると細骨材の
仮想フロー面積比は式(16)のように得られ
る。このとき表-2及び図-10から, $C_{(SP/B, 0)}$ の負
の値が大きくなるにつれて, 水粉体容積比の変
化によるモルタルフロー面積比の増分はペース
トフロー面積比の増分よりも卓越していくこと
を示している。

次に, 図-10に示すペーストとモルタルのフ
ロー面積比を表す直線の傾きについて考察す
る。図から, 各直線は減水剤*添加率によって大
きく変化し, 添加率が同じ場合にはペースト細
骨材率の変化に対してほぼ平行となることが判
る。減水剤*添加率ごとの傾きの平均は図-13
のようになり式(17)で示される。式(17)は
ペーストのフロー面積比が単位量だけ変化した
ときにモルタルのフロー面積比が変化する割合
を表すものである。水粉体容積比を増加させて
ペーストのフロー面積比を大きくする場合は減
水剤*を多く使用したペーストでは, 添加率が小

表-3 切片と傾き

SP/B	Vp/Vs	切片	傾き	傾き平均
0	1.0	-3.00	0.59	0.58
	1.2	-0.12	0.48	
	1.5	0.48	0.63	
1	1.0	-0.18	0.31	0.46
	1.2	0.97	0.49	
	1.5	2.63	0.59	
2	1.0	3.84	0.15	0.18
	1.2	4.60	0.19	
	1.5	5.69	0.20	

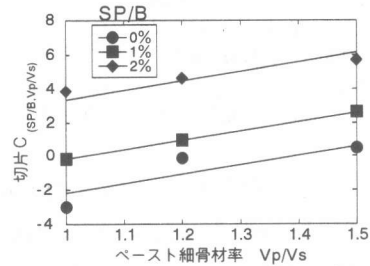


図-11 切片とペースト細骨材容積比の関係

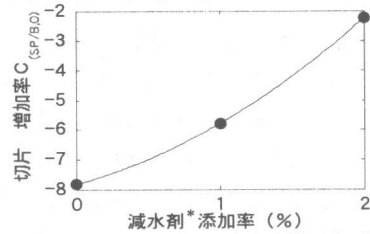


図-12 切片増加率と減水剤*添加率の関係

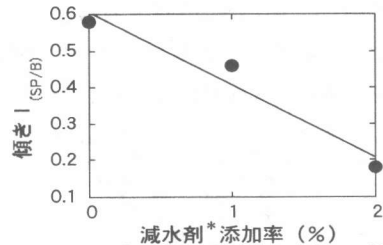


図-13 減水剤*添加率と傾き関係

$$\Gamma_m = C_{(SP/B, Vp/Vs)} + I_{(SP/B)} \times \Gamma_p \quad (10)$$

$$C_{(SP/B, Vp/Vs)} = C_{(SP/B, 0)} + 5.61(Vp/Vs) \quad (11)$$

$$C_{(0, Vp/Vs)} = -7.80 + 5.61(Vp/Vs) \quad (12)$$

$$C_{(1, Vp/Vs)} = -5.78 + 5.61(Vp/Vs) \quad (13)$$

$$C_{(2, Vp/Vs)} = -2.21 + 5.61(Vp/Vs) \quad (14)$$

$$C_{(SP/B, 0)} = -7.80 + 1.25(SP/B) + 0.78(SP/B)^2 \quad (15)$$

$$C_{(SP/B, Vp/Vs)} = -7.80 + 1.25(SP/B) + 0.78(SP/B)^2 + 5.61(Vp/Vs) \quad (16)$$

$$I_{(SP/B)} = 0.61 - 0.2(SP/B) \quad (17)$$

さいペーストに比べて必要な水量が減少する。また減水剤*添加率を大きくしたペーストを用いたモルタルでは、ペーストフロー面積比が増加してもそれに伴うモルタルフロー面積比の増加は減水剤*を使用しない場合に比べ小さくなる。

式(16), (17), (9)を(10)に代入すると図-10に示す各直線は式(18)の様に計算される。

$$\Gamma_m = \{-7.801 + 1.245(SP/B) + 0.775(SP/B)^2 + 5.61(V_p/V_s) + \{0.607 - 0.2(SP/B)\} \times \left[\frac{(V_w/V_b) - 1.08 \{1 - 0.45 \log_e(1 + SP/B)\}}{0.07 \{1 - 0.899 \log_e(1 + SP/B)\}} \right] \} \quad (18)$$

式(10)の Γ_p は式(9)から水粉体容積比(V_w/V_b)と減水剤*添加率(SP/B)の関数として与えられるためモルタルのフロー面積比は水粉体容積比, 減水剤*添加率, ペースト細骨材容積比を配合要因として推定することができる。

このようにして得られた, 式(18)によるモルタルのフロー面積比の推定値と実験値との比較を図-14に示す。両者間にはわずかな相違はあるが, 式(18)は実験値を十分に近似できることが判る。両者間の相違については実験のばらつきの他に, 図-13の関係を直線と仮定したことにもよる。この関係式については, 今後更に詳細な実験により検討を行う予定である。

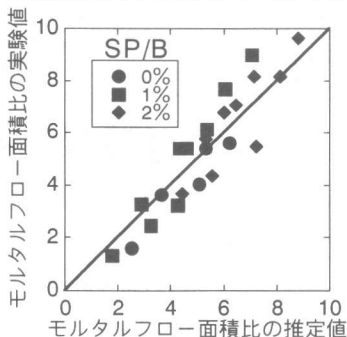


図-14 モルタルフロー面積比の推定値と実験値の比較

5. まとめ

本研究では, 高流動コンクリートの配合設計に関連して, ペーストの流動性からモルタルの流動性を推定する方法を考察した。その結果か

ら明らかになった点を以下に示す。

- 1) ペーストで使用する粉体の拘束水比は式(2)~(4)で示されるように減水剤*添加率により変化しその変化量は対数関数で表される。
- 2) 任意の配合のペーストフロー面積比は, 水粉体容積比と減水剤*添加率を用いた分数関数で表示できる。
- 3) 一定の流動性を持つペーストに細骨材を加えるにつれモルタルフロー面積比は直線的に小さくなる。
- 4) モルタルフロー面積比が1~10程度の範囲ではペースト細骨材容積比がそれぞれ一定の場合, 水粉体容積比とモルタルフロー面積比との関係は, 減水剤*添加率ごとに異なった直線群で示される。
- 5) ペーストとモルタルのフロー面積比の関係は細骨材の仮想フロー面積比を縦座標の切片とし, 減水剤*添加率から定まる傾きを用いて式(10)のように表される。
- 6) モルタルのフロー面積比を算定する式(10)にペーストのフロー面積比を与える式(1)を代入すれば任意の配合の高流動モルタルフロー面積比を算出することが可能である。

6. おわりに

本研究では細骨材の性質を一定にして, 実験を行ったため, より汎用的なモルタルのフローの推定に当たっては, 式(15), (16), に細骨材の性質(実積率・粗粒率等)や高性能AE減水剤の種類による特性を定量的に取り入れる必要があり, 今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 藏重 勲, 出光 隆, 山崎 竹博, 渡辺 明 : 高性能AE減水剤を用いたペーストの流動性に関する研究, セメント技術大会講演要旨 NO.52, pp.240-241, 1998.4
- 2) 岡村 甫, 前川 宏一, 小澤 一雄 : ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版 pp.35-47, 1993